

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0222-03

各向异性散射介质对偏振光传播的影响

李伟^{1,2} 曾楠¹ 云天梁^{1,2} 马辉^{1,2}

(¹ 清华大学深圳研究生院光学检测与成像实验室, 广东 深圳 518055; ² 清华大学物理系, 北京 100084)

摘要 在生物组织中都存在大量的纤维状结构, 散射光的偏振态反映了组织对偏振光的作用, 可以反映组织结构和类型信息。对偏振光传播行为的了解, 有助于提高偏振门的作用, 开发基于偏振光测量组织结构和病理信息的方法。为了研究纤维状散射体对偏振光的影响, 测量不同偏振方向的线偏振光经过牙齿的象牙质散射后散射光的分布和偏振变化, 透射光强度分布为各向异性, 在沿着象牙质中的细管方向透射光较强, 散射光沿细管方向传播较远。透射光的偏振状态与入射光偏振方向有关, 象牙质具有各向异性的光学性质。采用圆柱体散射模型模拟了纤维状散射体对光的散射作用, 结果表明有序排列的纤维结构不仅影响散射光的分布, 而且对光的偏振态也有重要影响。

关键词 医用光学; 散射; 蒙特-卡罗模拟; 偏振光

中图分类号 Q63 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0222

Propagation of Polarized Light in Anisotropic Scattering Medium

Li Wei^{1,2} Zeng Nan¹ Yun Tianliang^{1,2} Ma Hui^{1,2}

Laboratory of Optical Imaging and Sensing, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China
Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Many biological tissues consist of fibril structures. The scattered light of tissues provides abundant information about the properties of tissues. The polarization property of scattered light can reveal structure and type of tissue. Understanding the propagation property of polarized light in scattering medium is helpful to improve imaging gating method and diagnosis technology. In this paper, the transmitted light from a section of dentin was measured. A linearly polarized He-Ne laser beam was incident on the sample, and the transmitted light is recorded. The image showed anisotropic spatial distribution, indicating the light propagating along the fibers. The polarization property of the scattered light was related to the polarization direction of the incident light. A Monte Carlo simulation considering cylindrical scatterers was utilized to model the scattering property of microstructure in dentin. The experimental results are compared with the simulation. The ordered fibers have influence on the spatial distribution and the polarization state of scattered light.

Key words medical optics; scattering; Monte Carlo simulation; polarized light

1 引言

光学方法具有低损伤的特点, 在生物活体成像和诊断中有广泛的应用, 而且能提供丰富的组织信息。生物组织对光具有散射作用, 对偏振光的散射分析, 可以提供更多的信息^[1~3]。

偏振光在各向同性散射介质中传播时, 散射会造成偏振态无序化, 使偏振度降低^[3,4]。许多生物

组织具有各向异性的光学性质, 比如胶原纤维、肌肉、牙齿等。研究发现各向异性介质对光的散射与传播方向有关, 而各向异性介质对偏振光的作用研究还比较少^[5,6]。对偏振光在各向异性介质中的传播行为的了解, 有助于提高偏振门的作用, 开发基于偏振光测量组织结构和病理信息的方法。

本文测量不同偏振方向的线偏振光经过牙齿的

基金项目: 国家自然科学基金(60578003)、国家 973 计划(2006CB70570)和广东省自然科学基金(7301723)资助课题。

作者简介: 李伟(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光子散射模拟方面的研究。E-mail: liwei99@tsinghua.org.cn

导师简介: 马辉(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生物医学光子学方面的研究。

E-mail: mahui@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

象牙质散射后散射光的分布和偏振变化。用圆柱体散射模型模拟各向异性介质对光的散射,研究了纤维状散射体对光的散射作用,结果与实验定性符合。分析了各向异性介质对偏振光散射的机理,说明了圆柱体散射模型可以很好地描述各向异性介质散射对光的偏振态的作用。

2 方 法

2.1 实验装置与样品

采用线偏振光入射,测量偏振光经过介质后偏振光的状态。入射光为波长 633 nm 的 He-Ne 激光,光束直径 1 mm,经过偏振片起偏,垂直入射在样品上。通过样品后的光强分布经过一个透镜成像,透镜焦距 5 cm,用 CCD 成像(520 pixel×696 pixel,12 bit)。样品后面的偏振片测量透射光的偏振态。实验中旋转起偏片和检偏片的方向测量出射光 0°,90°,45°,−45°偏振分量的光强。样品为人的牙齿,纵向切割成厚度 350 μm 的切片。

2.2 蒙特-卡罗模拟

运用蒙特-卡罗模拟方法,通过追踪大量光子在介质中的散射过程,研究偏振光在散射介质中的传播^[5,6]。除了球状散射体外还存在非球形状散射体,有一些报道中将无穷长圆柱体模型加入体系进行研究^[7~9]。考虑光的偏振态时,在追踪大量光子的轨迹的同时还要考虑偏振状态的变化。光子的偏振状态常用 Stokes 矢量 S 表示,经过散射后偏振状态 $S' = M \times S$, M 表示散射的 Mueller 矩阵。光子的偏振态是以散射面作为参考面定义的。所以在模拟中,还需要跟踪参考面随着散射的变化。散射光的几率分布和 Mueller 矩阵根据米氏散射理论计算得出。从不同角度出射所对应的 Mueller 矩阵不仅与

散射体的半径、折射率等参数有关,还与光子入射角度 ξ 有关^[10]。由于圆柱体散射截面随着入射光与圆柱夹角 ξ 变化,

$$\mu_s(\xi) = Q_{scn}(\xi)dC_A,$$

式中 Q_{scn} 为散射效率, d 为圆柱直径, C_A 为圆柱散射体的面密度。所以为了确定光子平均自由程,先要计算光子的方向和圆柱的方向。圆柱的空间位置随机分布,方向角度分布假设为高斯形。每次散射后,光子的出射角度 θ 由散射相函数决定(图 1)。

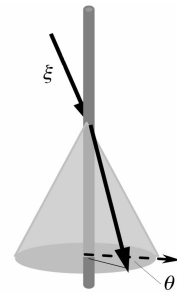


图 1 圆柱体散射示意图

Fig. 1 Schematic of light scattering by cylinder

3 结果与讨论

3.1 透射光强

透射光强的分布近似为椭圆形,在沿着细管的方向较强,在垂直于细管的方向强度较小。因为沿着圆柱体轴向的散射截面小,光子平均自由程较大,所以光子能传播得更远^[5]。圆柱体对光子具有传导作用。

在象牙质区域,测量两个正交偏振方向的透射光强差随着入射光偏振态的变化。首先透射光强偏振差随着入射偏振方向角度变化为三角函数形式,周期为 180°(π)。从图 2 可看出 45°和 135°检偏得到的偏振差 $I_{45\sim135}$ 随着入射光偏振变化振幅较小,而 0°和 90°检偏得到的偏振差 $I_{0\sim90}$ 随着入射光变化大。

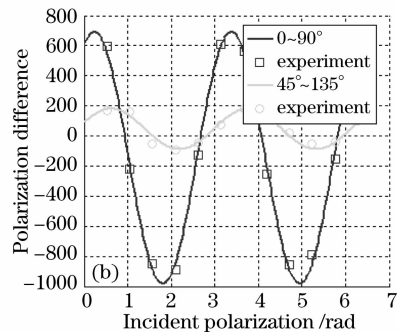


图 2 透射光强测量结果。(a)空间分布;(b)偏振差随着入射偏振方向的变化

Fig. 2 Transmitted light results. (a) Spatial distribution of transmitted light; (b) polarization difference as a function of incident polarization

偏振光经过散射后,由于散射的作用,将不再保持原来的偏振态。0°方向偏振的入射光,偏振方向

与牙齿中的细管方向接近平行,散射光保偏较好。 90° 偏振入射,偏振方向垂直于散射体轴向,散射光保偏也较好。用 45° 和 -45° 偏振检偏时,可以看出散射光退偏快。结果表明象牙质的散射表现出强烈的各向异性。散射光的退偏依赖于偏振方向与散射体方向的夹角。

3.2 模拟结果

牙齿中象牙质为淡黄色,不透明,由基质和牙本质小管组成,含有大量的细管,是空心的,内部用于输送液体,进行营养代谢。所以可以用内部含有有序排列的圆柱形散射体模拟象牙质,圆柱体内部折射率小于外部介质。牙本质中无机盐类约70%,主要为羟磷灰石、含磷酸钙等,有机物约30%,主要是胶原蛋白。模拟参数样品厚度 $350\ \mu\text{m}$,圆柱直径 $3\ \mu\text{m}$,折射率较小, $n=1.33$ 。外部介质是折射率较大的羟磷灰石, $n_m=1.64$ 。入射光为无限细的波长 $633\ \text{nm}$ 激光。假设圆柱方向沿着水平方向,光子传播方向垂直于圆柱时,散射系数为 $300\ \text{cm}^{-1}$ 。

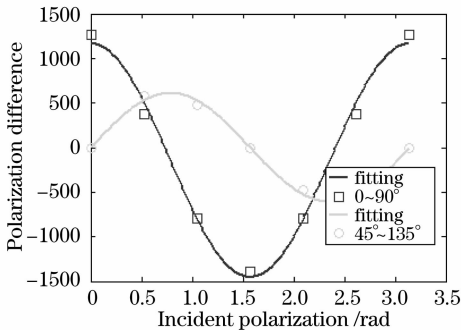


图3 模拟偏振差随着入射偏振方向的变化

Fig. 3 Simulated polarization difference as function of incident polarization direction

通过数值模拟可以得到透射光偏振分量随着入射光偏振角度变化的规律。对于球型散射体,偏振差随着入射光偏振方向变化的振幅与检偏方向无关,即入射光的退偏程度与方向无关,因为球散射体构成的介质是各向同性散射体。但是对于有序排列的圆柱体散射,散射光的偏振态与入射偏振方向有关。 0° 与 90° 偏振差的变化振幅大于 45° 与 135° 偏振差,与实验结果定性相符合。模拟结果受圆柱的大小和折射率的影响较大。定量的比较需要进一步考

虑象牙质样品的实际参数和内部结构。

从电磁场计算可知,当入射光偏振方向平行或者垂直于圆柱的轴向时,散射光的偏振方向保持不变,仍然为线偏振光。而当入射光的偏振方向与圆柱轴有夹角时,散射光将不再保持原来的偏振方向。

4 结 论

本文通过测量透射光的偏振状态随着入射光偏振状态的变化,研究了各向异性散射介质的光学性质。对于各向异性散射介质,不仅光的传播方向是各向异性的,而且散射光的偏振与方向有关。与实验结果的定性比较,说明介质中微观结构散射的各向异性造成宏观光学性质的各向异性。

参 考 文 献

- 1 Backman V, Gurjar R, Badizadegan K *et al.*. Polarized light scattering spectroscopy for quantitative measurement of epithelial cellular structures in situ[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(4): 1019~1026
- 2 Du Lingyan, Deng Yong, Ju Shan *et al.*. Measurement of polarized backscattering differential spectra for tissue phantom[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2038~2041
杜玲艳,邓勇,鞠珊等.组织模型偏振后向散射差分光谱的测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2038~2041
- 3 Sankaran V, Schonenberger K, Walsh J T *et al.*. Polarization discrimination of coherently propagating light in turbid media[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19): 4252~4261
- 4 Morgan S P, Khong M P, Somekh M G. Effects of polarization state and scatterer concentration on optical imaging through scattering media[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7): 1560~1565
- 5 Ramella-Roman J C, Prah S A, Jacques S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4420~4438
- 6 Li Wei, He Yonghong, Ma Hui. Polarization gating imaging in turbid medium: Monte Carlo simulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 518~522
李伟,何永红,马辉.偏振门用于对散射介质成像的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 518~522
- 7 Kienle A, Forster F K, Hibst R. Anisotropy of light propagation in biological tissue[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2617~2619
- 8 Kienle A, Hibst R. Light guiding in biological tissue due to scattering[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(1): 018104
- 9 Yun Tianliang, Li Wei, Jiang Xiaoyu *et al.*. Monte Carlo simulation of polarized light scattering in tissues[C]. *Photonics and Imaging in Biology and Medicine*, 2007
- 10 Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1983. 194~206